

# **ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA LIGAÇÃO VIGA PILAR COM CHAPA DE EXTREMIDADE EM PÓRTICO COMPOSTO POR PERFIS LAMINADOS DE AÇO**

Augusto Wanderlind (1); Prof. MSc. Marcio Vito (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1)[augustowanderlind@hotmail.com](mailto:augustowanderlind@hotmail.com) (2)[marciovito@unesc.net](mailto:marciovito@unesc.net)

## **RESUMO**

Atualmente encontram-se diversos pesquisadores, como LIN X. G. (2013), PATIL S. S. (2013) e SILVA H. R. G. (2014), estudando a rigidez de ligações de estruturas de aço, na busca por dimensionamentos mais realistas e mais eficientes. Para avaliar a ligação viga pilar de um pórtico plano, foi desenvolvido um experimento para aplicar cargas verticais em um protótipo. Este protótipo foi dimensionado através da norma americana ANSI-AISC.360-2010 para atender os requisitos de resistência até a plastificação total de sua seção. A ligação foi modelada analiticamente através do modelo proposto pela EUROCODE 3 part 1-8 de 2005 e numericamente através do método dos elementos finitos, com sua implementação calibrada pelos resultados experimentais obtidos com auxílio de *strain gages*. Com os resultados obtidos pode-se relacionar os efeitos de rigidez com a distribuição das cargas do elemento de viga para o pilar. Também foi desenvolvido um modelo de molas para modelagem de ligações semi-rígidas conforme a EUROCODE3.

*Palavras-Chave: pórtico, ligação, rigidez, eurocódigo, MEF.*

## **1. INTRODUÇÃO**

No projeto e dimensionamento de estruturas de aço construídas com perfis laminados ou soldados está difundido a utilização de sistemas estruturais aporticados, pilares e vigas formando pórticos através de suas conexões. Conforme ASSIS V. M. (2001), na prática a utilização de conexões ou ligações são definidas pelos projetistas na maioria dos casos como rígidas ou flexíveis, no caso de ligações rígidas considera-se simplificada, na análise estrutural, que o ângulo original entre viga e pilar mantém-se inalterado para qualquer intensidade de carregamento. Ainda para ASSIS V. M. (2001), na consideração de ligação flexível, entende-se que

a rotação relativa entre os componentes estruturais não possui nenhuma restrição. Porém o mesmo autor afirma que ao se tratar todas as ligações como semirígidas, ou seja, de levar em consideração a rigidez real das ligações, poderá exprimir com maior fidelidade o comportamento da estrutura, especialmente no que se refere aos valores dos esforços solicitantes, deslocamentos e comprimento de flambagem dos pilares.

Atualmente encontram-se diversos pesquisadores, como LIN X. G. (2013), PATIL S. S. (2013) e SILVA H. R. G. (2014), estudando a rigidez de ligações de estruturas de aço, na busca por dimensionamentos mais realistas e mais eficientes, por vezes tornando-as mais econômicas. É consenso destes autores que a melhor maneira de se obter resultados confiáveis, é a idealização da ligação viga pilar como um conjunto de molas responsáveis por transmitir os esforços entre os elementos bem como gerar os deslocamentos conforme a aplicação de carga aumenta. SILVA H. R. G. (2014) diz que para esta idealização satisfazer as condições realistas, o coeficiente de rigidez de cada mola necessariamente deve ser obtido através de experimentos laboratoriais. Segundo RODRIGUES M. C. (2009), a melhor forma de obter o real comportamento das ligações é justamente através de ensaios experimentais realizados em laboratório, entretanto, o mesmo comenta que o elevado custo destes ensaios e a dificuldade de medição dos resultados experimentais faz com que esta não seja uma técnica adotada na prática, mas por outro lado, ainda RODRIGUES M. C. (2009) afirma que é através destes ensaios que se torna possível calibrar os modelos idealizados por molas para avaliação do comportamento da ligação.

Autores como, LIN X. G. (2013), PATIL S. S. (2013) e SILVA H. R. G. (2014) realizaram experimentos um pouco diferenciados entre si, porém com o mesmo objetivo de obter curvas gráficas de momento (kN.m) por rotação (mrad) entre uma viga e um pilar, para assim levar em consideração as propriedades mecânicas do aço e as geometrias das peças, obtendo-se o valor de rigidez da ligação. Uma prática comum entre esses autores é realizar a comparação entre as curvas geradas através do experimento e as curvas geradas através dos procedimentos de cálculos encontrados na norma EUROCODE 3 part 1-8 de 2005. A norma brasileira NBR 8800:2008 não prevê tais considerações, apenas instrui que para o projetista

considerar a rigidez real de uma ligação, o mesmo deve se apoiar em experimentos normatizados, e na falta dos mesmos, utilizar os procedimentos de cálculo da EUROCODE 3 part 1-8 de 2005.

SILVA H. R. G. (2014) entende que:

com a evolução dos meios computacionais, as alternativas numéricas, mesmo para situações complexas, revelam-se um forte aliado aos ensaios experimentais. No caso concreto das ligações, a utilização do método dos elementos finitos (MEF) possibilita a realização de análises detalhadas e complexas dos fenômenos envolvidos na ligação, desde que devidamente validados por resultados de ensaios experimentais, permitindo desta forma a realização de estudos paramétricos alargados.

Para SILVA H. R. G. (2014), através da utilização do MEF é possível incrementar a análise estrutural, a não linearidade do material aço, no caso, o seu encruamento nas partes de maior deformação, possível de se obter através do conhecimento de suas propriedades mecânicas.

O presente estudo foi realizado com a análise experimental de maneira a simular uma situação de carregamento real nas peças que compõem um pórtico plano de aço, para se obter especificamente o comportamento de uma ligação rígida, conhecida como ligação viga-pilar com chapa de extremidade. A partir dos dados obtidos no experimento foi construído um modelo de elementos finitos a fim de se obter resultados equivalentes. Todas as análises foram comparadas com as respostas obtidas através dos métodos analíticos presentes na EUROCODE 3. O objetivo principal de se obter estes dados é para a construção de um modelo mecânico de molas que possa auxiliar a obtenção da capacidade de rotação de tal sistema de ligação.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi dividido em duas partes, primeiramente na análise experimental e posteriormente na análise numérica através do MEF com calibração a partir da análise experimental. Em ambas análises, as ligações foram modeladas pelo

método das componentes, em que são procedimentos para a construção de um modelo mecânico de molas, este método é utilizado pela EUROCODE 3 para avaliar a rigidez da ligação.

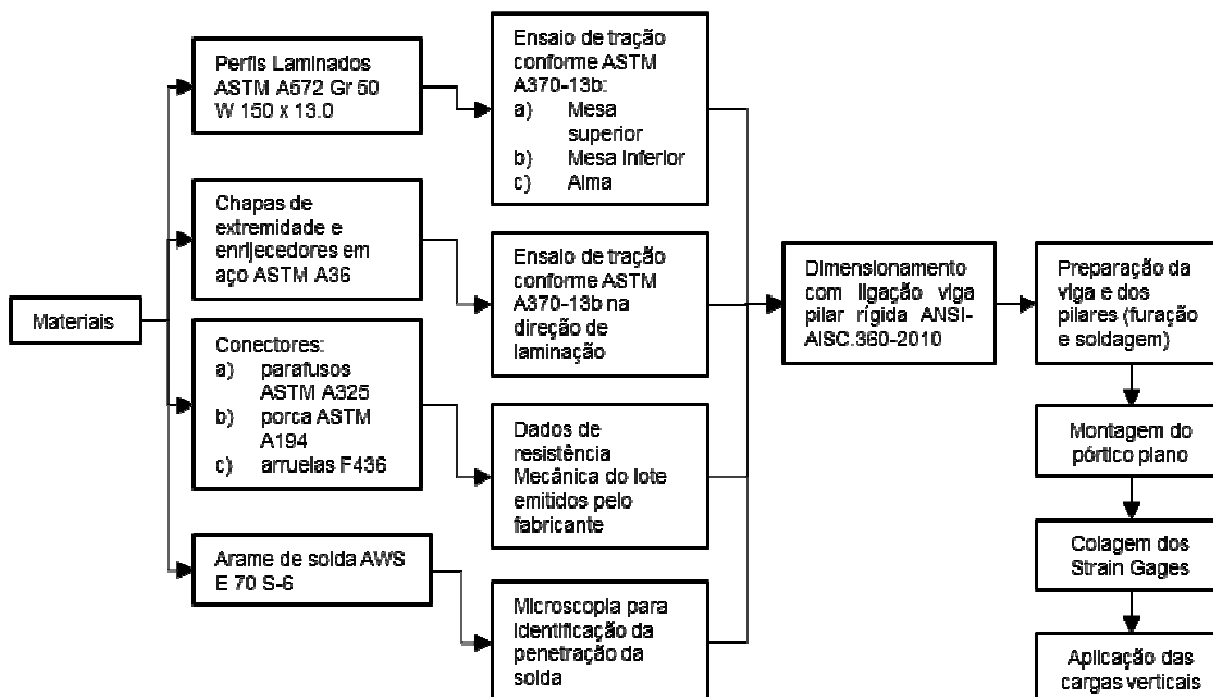
## **2. 1 ANÁLISE EXPERIMENTAL**

Foi desenvolvido um experimento a fim de simular a aplicação de cargas verticais em pórticos planos, para que a ligação do mesmo estivesse sujeita a momentos fletores. Este desenvolvimento pode ser dividido em 3 etapas:

1. O dimensionamento de um pórtico plano;
2. A fabricação do pórtico;
3. A Montagem do experimento.

As características mecânicas dos materiais dos perfis laminados e das chapas de ligação foram obtidas através de ensaios de tração normatizados pela ASTM A370-13b e estão apresentadas na tabela 1, já as propriedades mecânicas dos parafusos foram obtidas através do laudo técnico de ensaio de tração realizado pelo próprio fabricante e também estão apresentados na tabela 1. O fluxograma apresentado na figura 1 mostra as etapas para a fabricação e experimentação do pórtico plano.

Figura 1: fluxograma esquemático para o desenvolvimento do experimento.



Fonte: do autor.

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos materiais utilizados, obtidas pelo ensaio de tração presente na norma ASTM A370-13b:

	Tensão de escoamento $f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	Tensão limite de resistência $f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	Alongamento total (%)	Módulo de elasticidade (kN/cm <sup>2</sup> )
Mesa superior	36,8 ± 0,4	50,0 ± 0,3	26,9 ± 0,6	21034 ± 95,5
Mesa inferior	36,7 ± 0,5	50,5 ± 0,2	25,8 ± 0,5	21020 ± 90,9
Alma	36,6 ± 0,5	50,2 ± 0,2	28,4 ± 0,4	20844 ± 91,7
Chapa de extremidade	27,3 ± 0,3	45,8 ± 0,9	26,4 ± 0,8	20651 ± 75,8
Parafuso	64,8 ± 1,0	84,3 ± 0,6	-	-

Fonte: do autor.

Na etapa 1, o dimensionamento do pórtico foi realizado de maneira a serem evitados quaisquer efeitos de flambagem e de flambagem local antes da seção atingir o

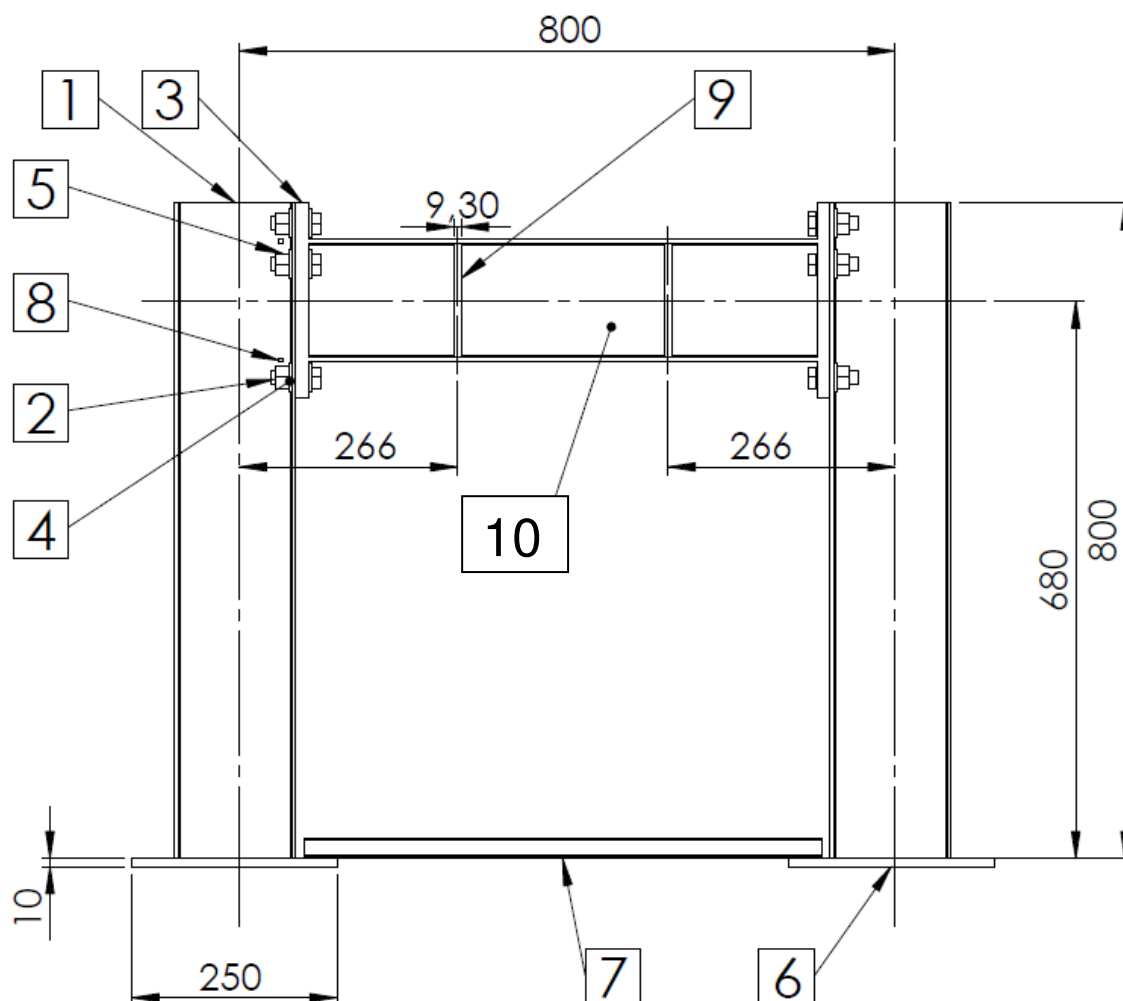
momento de plastificação total ( $M_p$ ) e ainda se obter nós indeslocáveis. As equações e os procedimentos de cálculo foram seguidos os que constam na norma americana ANSI-AISC.360-2010.

Na etapa 2, foram seguidas as recomendações da norma ANSI-AISC.360-2010 e da AWS D1.1/D1.1M:2010, utilizando perfis laminados de aço ASTM A572 Gr 50, soldagem MAG com arame E 70 S-6, parafusos em aço ASTM A325-14, arruelas lisas em aço ASTM F436-11, porcas em aço ASTM A194, as chapas de extremidade, chapas de apoio e barras de travamento em aço ASTM A36.

A etapa 3 consiste na aplicação de carga e coleta dos dados provenientes da instrumentação do pórtico. Para isso foi utilizado um pórtico de reação com uma bomba hidráulica capaz de aplicar até 500 kN. Foram aplicadas duas cargas concentradas, uma em cada terço do vão teórico da viga. As cargas foram medidas através de uma célula de carga calibrada e os dados foram coletados com auxílio de um módulo de aquisição de dados (QuantumX MX840B). Os deslocamentos da viga e do pilar, foram aferidos com um LVDT posicionado na metade do vão teórico da viga e outro posicionado no pilar à 680 mm de sua base. Estes dados também foram coletados com o módulo de aquisição QuantumX MX840B.

A figura 2 é o desenho construtivo do pórtico a ser ensaiado, com as identificações das peças necessárias para a construção do mesmo. Na tabela 2 constam os nomes de cada peça identificada na figura 2.

Figura 2: desenho do pórtico plano.



Fonte: do autor.

Tabela 2: identificação das peças.

Identificação na figura 2	Nome da peça	Material
1	Pilar	ASTM A572 Gr-50
2	Parafuso	ASTM A325
3	Chapa de extremidade	ASTM A36

Identificação na figura 2	Nome da peça	Material
4	Arruela	ASTM F436
5	Porca	ASTM A194
6	Chapa de apoio	ASTM A36
7	Barras de travamento	ASTM A36
8	<i>Strain gage</i>	-
9	Enrijecedor	ASTM A36
10	Viga	ASTM A572 Gr-50

Fonte: do autor.

A figura 3 (a) e (b) mostra o detalhamento da ligação viga pilar e o posicionamento dos *strain gages* SG1, SG2 e SG3. Na figura 3 (c) está detalhado o perfil das barras de travamento. O posicionamento das barras de travamento, a largura da chapa de apoio e o posicionamento dos *strain gages* SG4 e SG5 estão indicados na figura 3 (d). O SG4 está localizado na mesa superior da viga e o SG5 na mesa inferior da viga.

Figura 3: detalhes do pórtico.

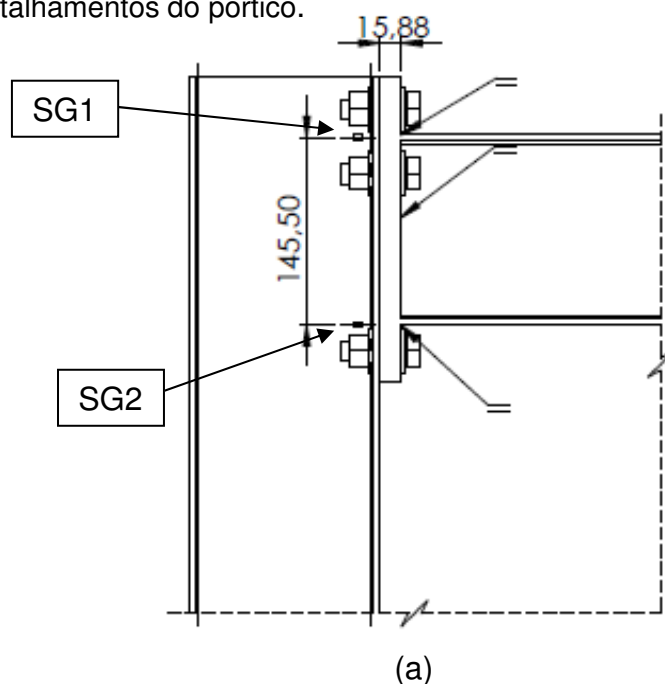
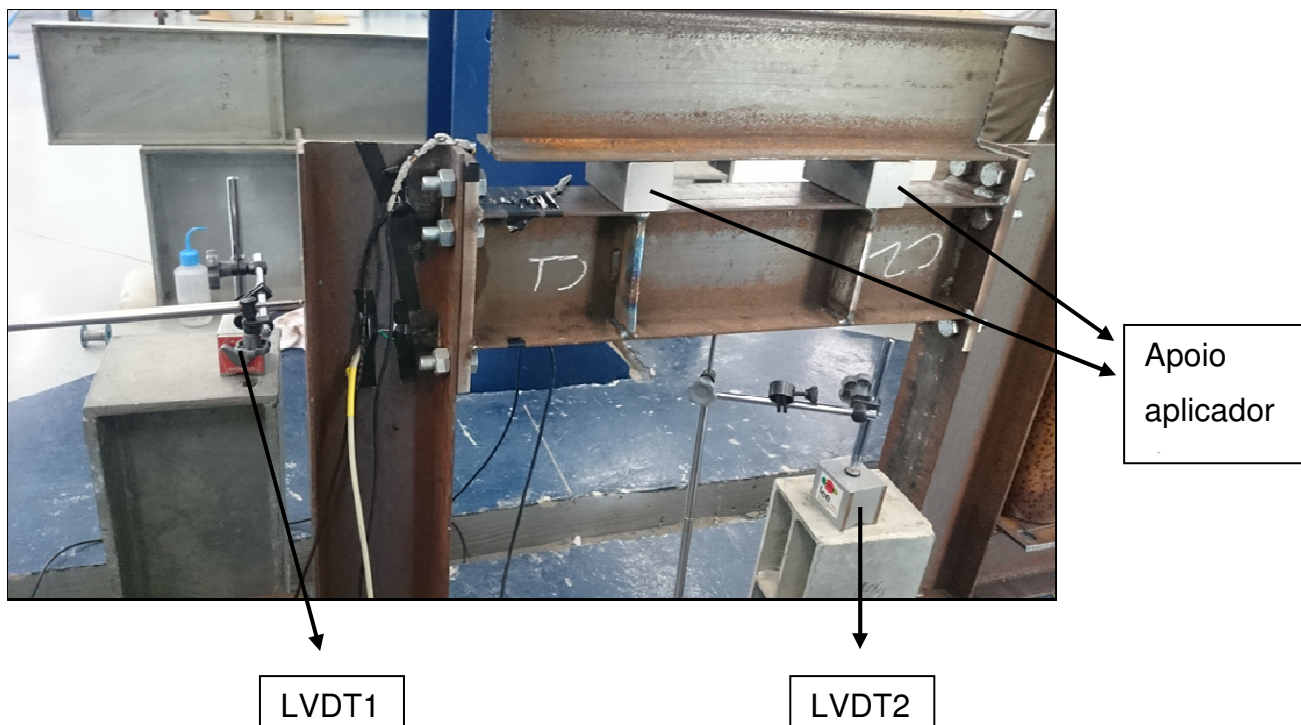






Figura 4: identificação do pórtico preparado para ser ensaiado.



Fonte: do autor.

O pórtico plano apresentado até o momento, será chamado de PP1 (pórtico plano 1). Foi construído um segundo pórtico, que será chamado de PP2. A única diferença entre o PP1 e o PP2 é a espessura na chapa de extremidade, em que para o PP1, como consta no desenho construtivo da figura 2, é de 15,88 mm. Para o PP2 a espessura é de 8,5 mm.

A figura 5 (a) e (b) mostra o detalhe da ligação do PP1 e do PP2 respectivamente, antes da realização do ensaio.

## 2. 2 ANÁLISE NUMÉRICA

Para a simulação do comportamento da ligação foram realizadas três modelagens. A primeira, seguiu as recomendações da norma europeia EUROCODE 3 part 1-8 de 2005, utilizando o método das componentes e os procedimentos de cálculo referentes ao modelo mecânico de molas desta tipologia de ligação (Beam-to-

column joint with bolted end-plate connections). A equação (1) foi utilizada para se obter o gráfico de momento atuante por rotação da ligação.

$$\frac{M}{\theta} = \frac{Eh^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad \text{equação (1)}.$$

Em que:

M é o momento atuante na ligação.

$\theta$  é a rotação da ligação.

E é o módulo de elasticidade.

h é o braço de alavanca do binário atuante nas mesas do perfil da viga.

$\mu$  é a taxa de rigidez da ligação.

$k_i$  são os coeficientes referentes a contribuição nas deformações da ligação, molas idealizadas.

A segunda modelagem utilizou a equação (2), esta foi desenvolvida por SOUZA (1999) e utilizada posteriormente por outros autores, como, ASSIS V. M. (2001) em que ambos comparam seus resultados com os obtidos através da equação (1).

$$\theta = 2,796 \times 10^{-5} KM \left[ 1 + \left( 3,972 \times 10^{-3} KM \right)^{3,32} \right] \quad \text{equação (2)}$$

Em que:

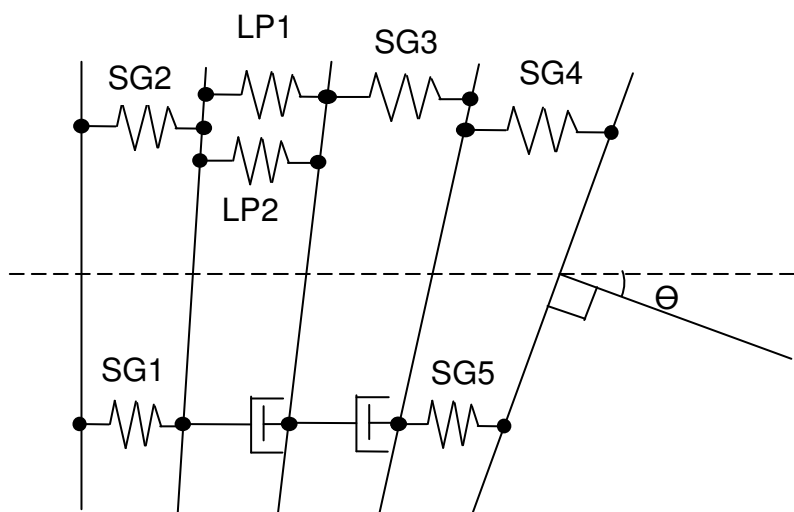
$\theta$  é a rotação da ligação.

K é um parâmetro de padronização que depende da geometria dos elementos constituintes da ligação.

M é o momento atuante na ligação.

A terceira modelagem foi desenvolvida pelo autor separando a contribuição dos elementos da ligação verificada através da análise experimental. Estes dados foram obtidos através dos cinco *strain gages* e implementados num modelo de molas como indicado pela EUROCODE 3. A figura 6 mostra o modelo mecânico utilizado para representar a ligação experimental que posteriormente foi implementada na análise numérica. Onde SG1, SG2, SG3, SG4 e SG5 representam as aferições de cada *strain gage*, LP1 e LP2 representam a parcela de rigidez atribuídas às linhas de parafusos.

Figura 6: modelo mecânico de molas da ligação no experimento.



Fonte: do autor.

Para análise numérica a viga da estrutura foi discretizada através de elementos quadriláteros 2D formados por vigas e cascas. São comparados dois modelos, considerando a distribuição de 100% do momento através da ligação rígida, e considerando a distribuição com a rigidez encontrada na análise experimental.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os dados experimentais calibrou-se um modelo de elementos finitos de duas dimensões baseado em equações diferenciais lineares utilizando a lei de Hooke. Com os dados numéricos o modelo de molas pode ser incrementado para se definir

os coeficientes de rigidez competentes de cada elemento da ligação. Após foi realizada uma aproximação potencial que descreve a curva de momento por rotação da ligação. A equação é apresentada a seguir:

$$S_j = \Delta M / (P \cdot e^{(-k \cdot \Theta)})$$

Onde:

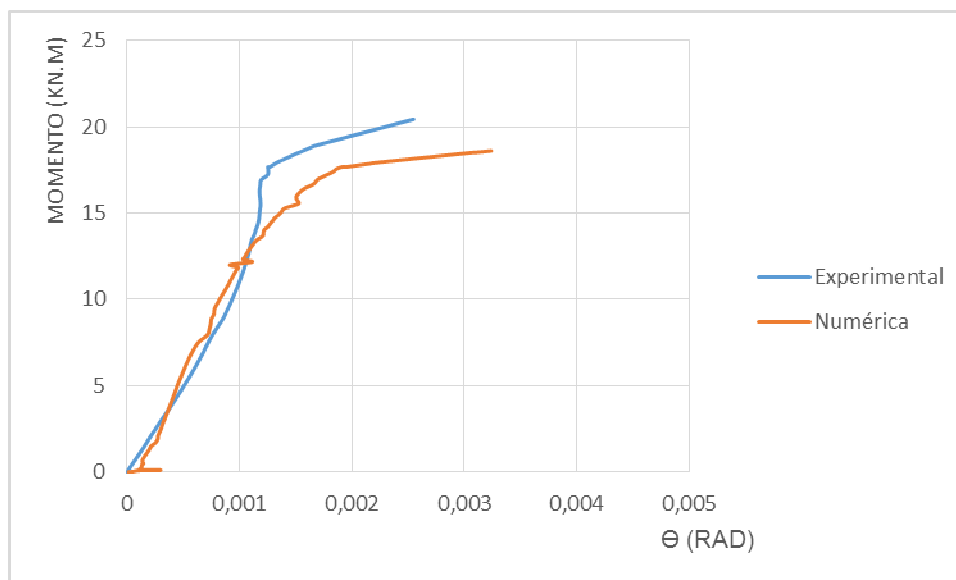
$S_j$  é a rotação da ligação em kN/rad.

$\Delta M$  é a variação do momento para o incremento de rotação.

$P$  é uma constante determinada pelas características geométricas da ligação com base na resolução de SOUZA (1999).

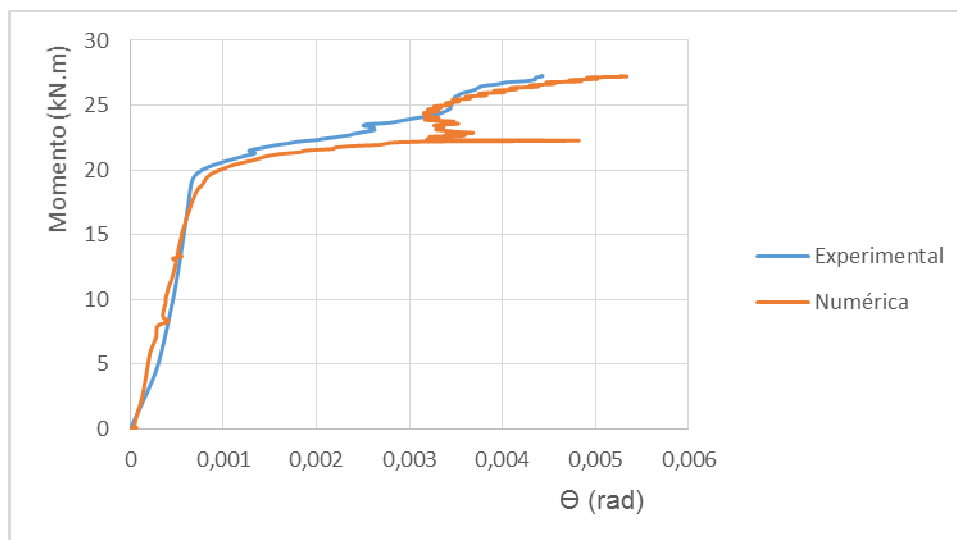
Na figura 7 estão plotadas a curva momento por rotação do modelo numérico e a curva experimental para o PP1. Na figura 8, faz-se a mesma plotagem para o PP2.

Figura 7 – Curva numérica e curva experimental de momento por rotação para o PP1.



Fonte: do autor.

Figura 8 – Curva numérica e curva experimental de momento por rotação para o PP2.



Fonte: do autor.

Na tabela 3 está comparado os resultados de rigidez da ligação, para o modelo experimental, numérico, EUROCODE 3 e SOUZA (1999) de cada pórtico. A rigidez foi calculada através da reta secante conforme a EUROCODE 3.

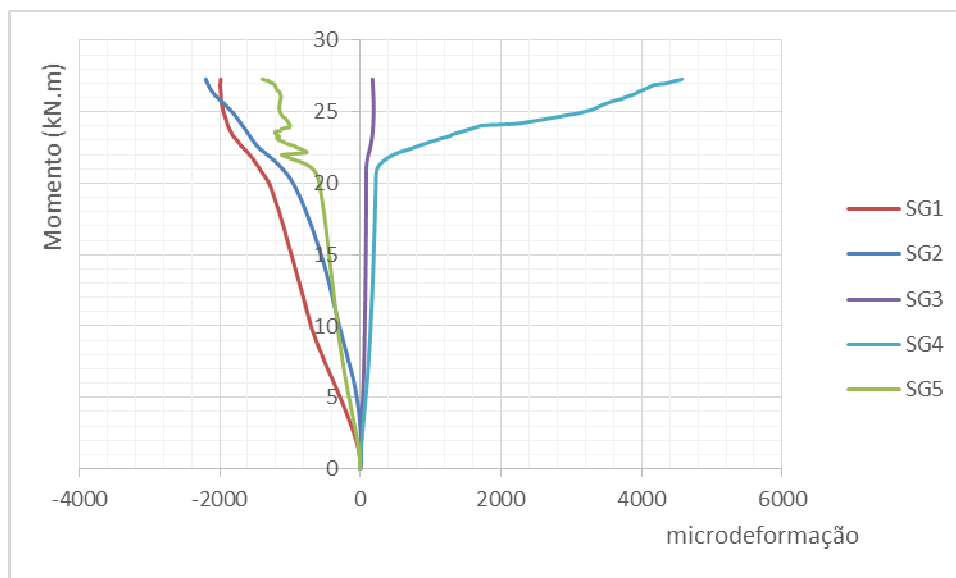
Tabela 10 – Rigidez da ligação.

Curva	Rigidez PP1 (kN/rad)	Rigidez PP2 (kN/rad)
Experimental	25656	12272
Numérica	20553	11506
EUROCODE 3	18846	10905
SOUZA (1999)	17281	9104

Fonte: do autor.

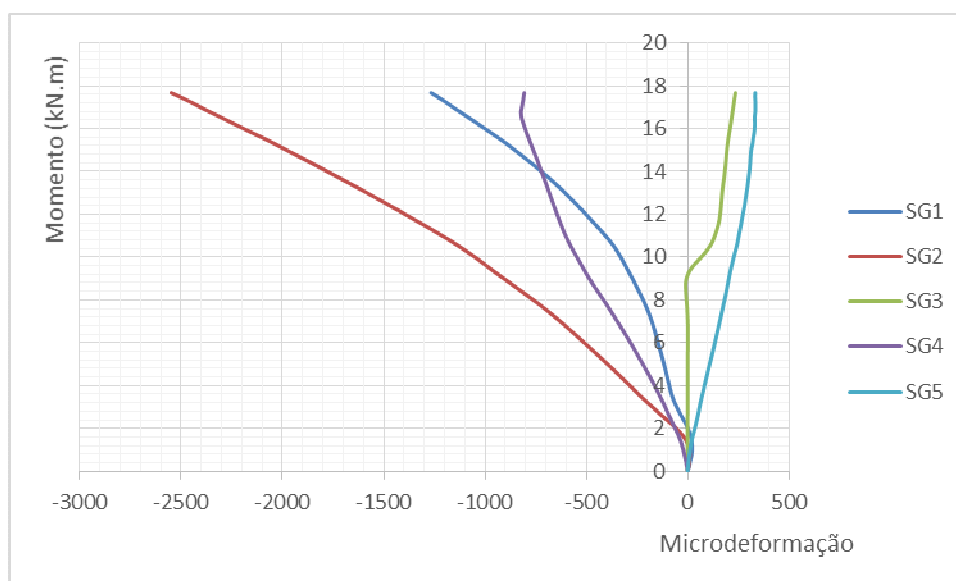
Na figura 9 estão as curvas de momento por deformação específica de cada *strain gage* para o PP1. Na figura 10, faz-se a mesma plotagem para o PP2.

Figura 9: curvas de momento por microdeformação para cada *strain gage* do PP1.



Fonte: do autor.

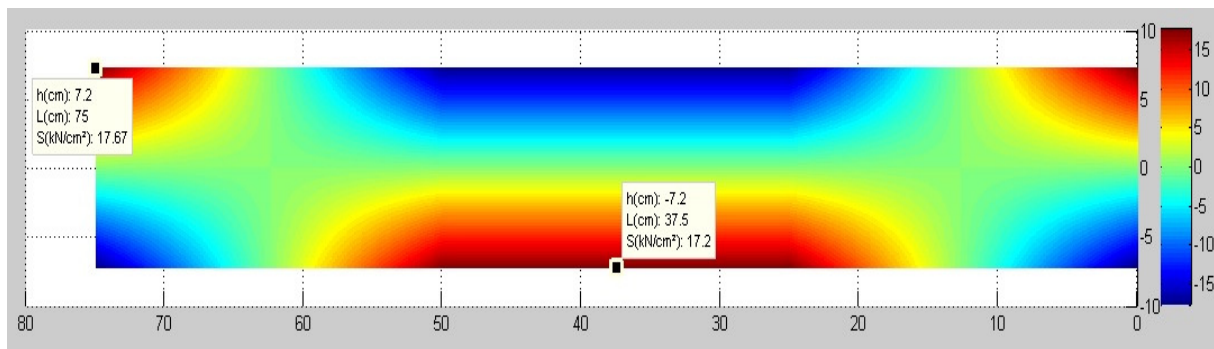
Figura 10: curvas de momento por microdeformação para cada *strain gage* do PP2.



Fonte: do autor.

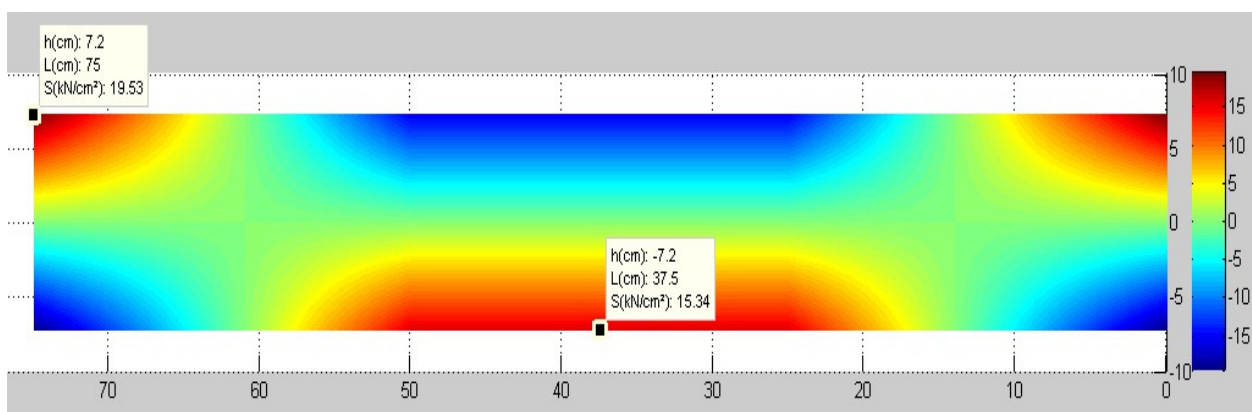
As figuras 11 e 12 são respectivamente a representação da distribuição de tensões principais presentes na viga considerando a rigidez avaliada nos experimentos PP1 e PP2.

Figura 11 – Distribuição de tensões principais PP1.



Fonte: do autor.

Figura 12 – Distribuição de tensões principais PP2.



Fonte: do autor.

#### 4. CONCLUSÕES

Nota-se que a rigidez numérica do PP1 em relação com a rigidez experimental foi de 19,9% menor, enquanto a rigidez numérica do PP2 foi de 6,2% menor. O fato da análise numérica não ter considerado a não-linearidade do aço pode ocasionar valores menores de rigidez que os reais, já que o efeito de endurecimento do aço com a deformação afeta na sua distribuição de cargas. Conforme a concentração de material aumenta, este efeito torna-se mais significativo. É razoável que para ligações mais rígidas seja necessário a consideração de tal efeito.

Analisando as figuras 9 e 10, pode-se concluir que com a menor espessura da chapa de extremidade, ocasionando a menor rigidez da ligação, a distribuição dos



esforços alterou para menores valores de momento, mesmo antes de atingir o início de plastificação da seção. A mudança de distribuição dos esforços pode ser analisada através das análises numéricas do perfil longitudinal da viga. Para grandes estruturas essa redistribuição de esforços afetam significativamente nos efeitos de segunda ordem como explicado por LIN X. G. (2013).

## 5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. NBR 8800. Rio de Janeiro, 2008.

DE SOUZA A. S. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos, fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo, 1982.

EUROPEAN STANDARD. **Design of steel strictures – part 1-8: Design of joints**. Eurocode 3 EM 1993-1-8 (2005).

KAMINSKI, J. **Determinação da rigidez rotacional de ligações com dupla cantoneira em estruturas de aço**. Rio Grande do Sul, 2012

LIN X. G. **Calculation of initial stiffness of semirid connections with consideration of rotational constraint on angle from beam contact surface**. Japan, 2013

PATIL S. S. **A study of R.C.C. beam-column connection subjected to monotonic loading**. India 2013.

PFEIL W. **Estruturas de aço, dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800-2008**. Rio de Janeiro, 2009

STRAIN, **Strain British Society for Strain Measurements**. London, 2015

TIMOSHENKO S. P. **Teoria da Elasticidade**. Rio de Janeiro, 1980.